

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)
Кафедра Общей Физики 1
Направление «Прикладные математика и физика»



**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО
ФРОНТА**

Бакалаврская работа студента

_____ **Лофиченко Олега Петровича**

Научный руководитель:

_____ д. ф.-м. н., проф. **Венедиктов В.Ю.**

Рецензент:

_____ к. тех. н., асс. **Горелая А.В.**

Санкт-Петербург
2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| Принципы адаптивной оптики..... | 4 |
| Датчик волнового фронта..... | 7 |
| Датчик Шака-Гартмана..... | 8 |
| Другие виды датчиков волнового фронта..... | 10 |
| Голографический датчик волнового фронта..... | 13 |
| Схема записи матрицы голограмм..... | 16 |
| Принципиальная схема голографического датчика..... | 20 |
| Практическая часть..... | 23 |
| Заключение..... | 27 |
| Список литературы | 28 |

ВВЕДЕНИЕ

С проблемой корректировки искажений волнового фронта сталкиваются во многих областях оптики. Решением этих проблем занимается адаптивная оптика, активно развивающаяся в последние годы, и, находящая применение в астрономии, лазерных системах, офтальмологии и многих других областях, требовательных к качеству оптического изображения.

Неотъемлемой составляющей таких адаптивных оптических систем является датчик волнового фронта. Различные виды датчиков имеют свои преимущества и недостатки, а создание “идеального” датчика является открытой проблемой. Исследованию одного из видов датчиков, а именно голографического, имеющего ряд преимуществ перед самым распространенным на сегодняшний день датчиком Шака-Гартмана, посвящена данная работа.

Глобальной целью работы является создание голографического датчика волнового фронта. Локальной же задачей является ознакомление с принципами работы данного вида устройств, анализа их перспективности, принятие участия в создании установки, необходимой для дальнейших этапов по созданию голографического датчика.

ПРИНЦИПЫ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

Распространяясь в неоднородных средах, свет претерпевает искажения.

Эти искажения приводят к ухудшению качества оптического изображения, снижению плотности потока излучения и т.п. В оптике и оптической технике крайне важной является задача обеспечения высокого качества изображения. Однако в следствии случайных воздействий волновой фронт искажается. Изучением методов устранения таких нерегулярных искажений(аббераций), занимается такой раздел оптики как адаптивная оптика.

Адаптивная оптика комбинирует в себе принципы классических средств оптики, радиофизики и теории управления. Возможность компенсации атмосферных искажений рассмотрел В.П. Линник в 1957, а в 1958 году Бэбкок предложил использовать управляемые оптические элементы с обратной связью. Недостаточный уровень развития техники привел к тому, что эксперименты по корректировке атмосферных искажений начали проводиться лишь в 70х годах. Также в те годы начали проводиться работы по применению адаптивных систем в формировании и фокусировке лазерных пучков. Важным для развития адаптивной оптики являются сборник трудов Харди и Фрида 1979 года “Активная оптика”. Развитие адаптивной оптики стимулировалось задачами проектирования оптических телескопов и развитием лазерных технологий[1]. Сейчас адаптивные оптические системы нашли широкое применение.

При наличии аббераций ход лучей становится отличным от хода лучей в идеальной оптической системе. Оптическим системам присущи два типа аббераций: статические — постоянные во времени. Их возможно скомпенсировать за счет методов оптического проектирования (подбора определенных параметров оптических систем); динамические —меняющиеся случайным образом во времени.

Адаптивные оптические системы используется в астрономии, лазерной технике, а также офтальмологии и прочих других областях[2].

В астрономии волновой фронт от звезды, проходя через атмосферу, искажается под воздействием турбулентности.

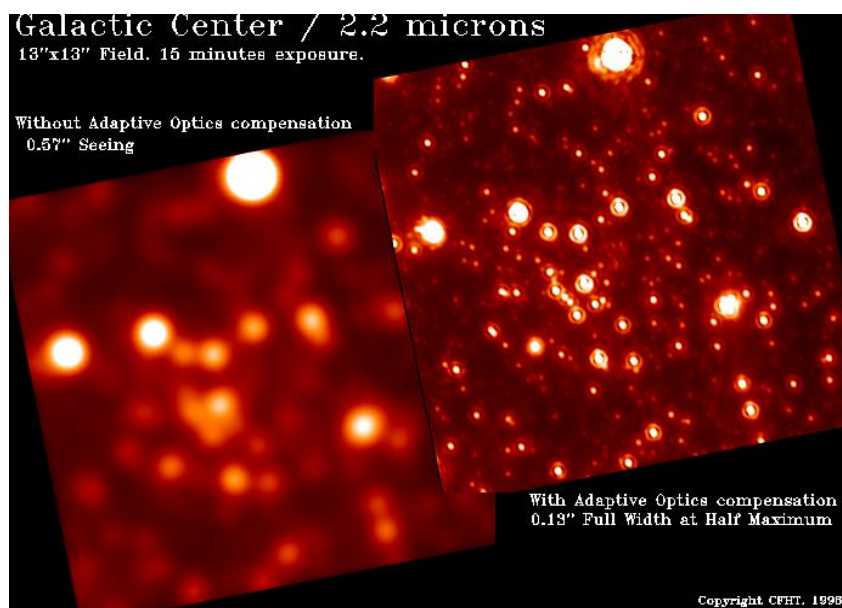


рис.1 Снимок телескопа CFHT центра нашей галактики с адаптивной системой и без

Схожая ситуация возникает в лазерных системах, в вопросах офтальмологии. Средствами адаптивной оптики возможна динамическая коррекция этих искажений.

Адаптивная оптика оперирует понятием волнового фронта, под которым подразумевается поверхности равной фазы световой волны. При наличии aberrаций волновой фронт будет отличаться от плоскости. Это отличие необходимо измерить и скорректировать. Коррекция зачастую связана с таким понятием как обращение волнового фронта. Обращенный волновой фронт является обратным к искаженному и путем наложения таких фронтов можно получить плоский фронт. В качестве корректоров зачастую применяют гибкие зеркала. Они состоят из набора зеркальных поверхностей, изменяющих свое положение при помощи актуаторов. Гибкие зеркала делятся на два типа: зональные —разбиваемые на равные поверхности, отвечающие за отдельный сегмент волнового фронта и модальные —разбиваемые на поверхности различного размера, каждая из которых соотносится с определенной модой[2].

Адаптивные оптические системы обычно включает в себя датчик волнового фронта, регистрирующий волновой фронт, корректора волнового фронта и системы управления.

Рассмотрим схему адаптивной оптической системы на примере телескопа с сегментированным зеркалом:

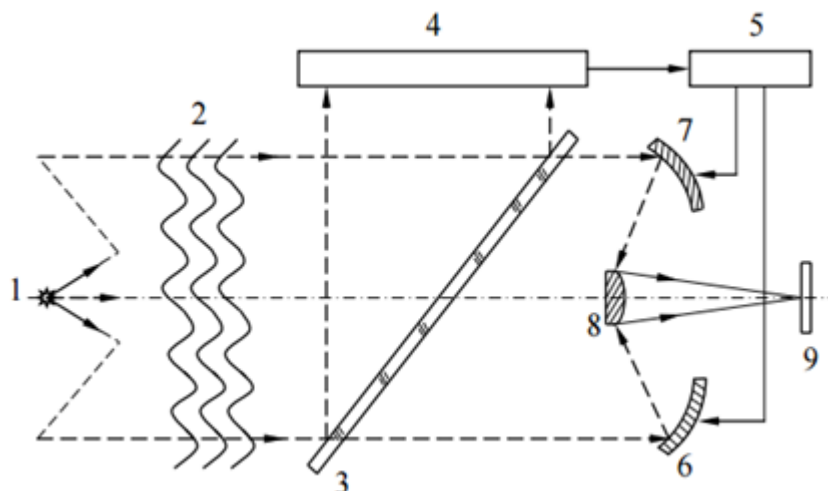


рис2. Принципиальная схема адаптивного телескопа с прямым управлением

Звездный свет (1) проходит через турбулентную атмосферу (2), разделяясь делителем (3), падает на датчик волнового фронта (4), который фиксирует информацию о искажениях волнового фронта и передает их в управляющее устройство (5), формирующее сигнал для управляемых зеркал (6-7). Другая часть света после светоделителя, попадая на зеркала (7-8-9), создает изображение объекта(звезды) в плоскости (9). Данная система прямого управления отличается высоким быстродействием. Однако имеет ряд недостатков, например, не решает проблему искажений, возникающих после светоделителя (3). Введение в данную систему обратной связи частично решает эти недостатки, но приводит к существенному снижению быстродействия[3].

ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Важным элементом адаптивной оптической системы является датчик волнового фронта(ДВФ). Датчик позволяет измерять отличие волнового фронта от плоского, а затем передавать эту информацию последующим элементам адаптивной системы. Поэтому точность его работы важна для системы в целом.

Задачу об определении искажений волнового фронта можно решать интерферометрическими методами.

Тем не менее в ДВФ эти методы не используются по ряду причин:

в астрономии, проходящий через турбулентность атмосферы, звездный свет не является когерентным и соответственно не подходит для интерферометров. А алгоритмы обработки неопределенности фазового сдвига интерферометров требуют времени, вопрос которого критичен в обработке быстрых атмосферных искажений.

Принципиально ДВФ состоит из нескольких элементов : системы пересчета аббераций в интенсивность света, формирующей распределение интенсивности на приемнике-матрице ПЗС/КМОП-камере. Сигнал с приемника поступает на реконструктор, который пересчитывает его в фазовые искажения[2].

ДАТЧИК ШАКА-ГАРТМАНА

На сегодняшний день широкое распространение среди ДВФ получил датчик Шака-Гартмана(ДШГ). Это объясняется его относительно простым устройством, надежностью и невысокой стоимостью.

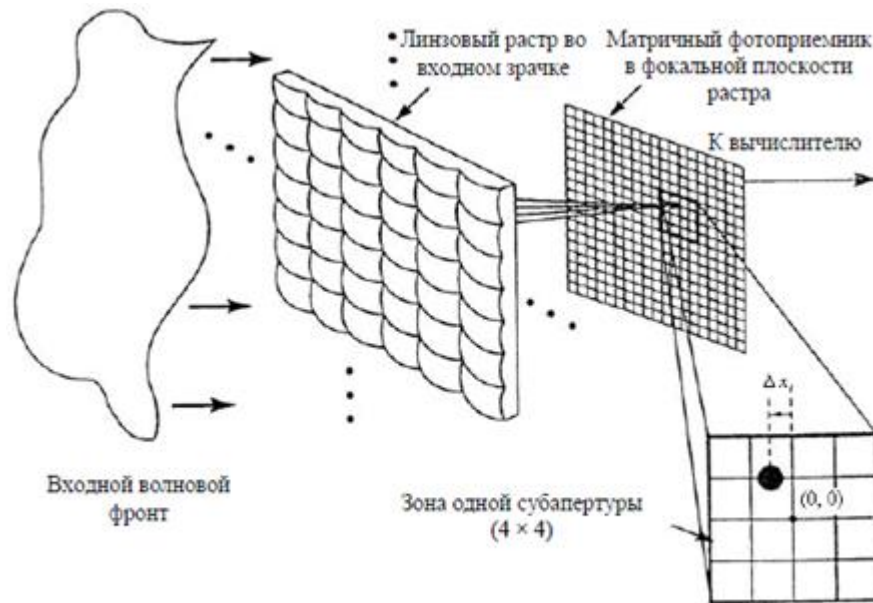


рис.3 Принцип действия ДШГ

Принцип действия: пусть на линзу вдоль ее оси падает волна и сфокусированное изображение(пятно) также будет находиться на оси линзы в случае, если волна не искажена (и соответственно не наклонена), в противном случае фокусная точка смещается и по этому смещению можно судить о наклоне волны. Далее, взяв набор таких линз, разбивающих волновой фронт на сегменты, называемые субапертурами, можно для каждого из сегментов аналогично определить наклон волны по положению фокусной точки. Набор микролинз(растр) фокусирует фронт на ПЗС-матрицу.

Если входная волна является плоской, то точки фокусировки не смещены, а при наличии искажений смещаются. Затем для каждой фокусной точки считается мера ее смещения от центра, откуда определяется мера наклона. Проинтегрировав все наклоны, восстанавливается информация о волновом фронте в целом.

Пусть $\varphi(r)$ -фаза волнового фронта, тогда наклон вдоль оси x по площади субапертуры S :

$$x = \frac{\lambda}{2\pi S} \int_S \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r_x} dr.$$

Сам наклон вдоль x и y оценивается по смещению от центра:

$$x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}},$$

$I_{i,j}$ – интенсивность на (i,j) пикселе
фотоприемника

ДШГ ахроматичен, то есть не зависит от длины волны излучения, слабо реагирует на вибрации, прост и компактен.



рис.4 Гартманограмма(фокальные пятна)

Матрица фотоприемника обычно берется размером в несколько Мегапикселей.

Минимальное количество субапертур определяется требуемым разрешением и составляет, как минимум, 20 x 20 субапертур. Линза субапертуры фокусирует пятно в площадку 20 x 20 пикселей, тогда для одного измерения волнового фронта потребуется несколько Мегабайт. Для высокочастотных атмосферных искажений, измеряемых в реальном времени, это число составит Гигабайты(требующей обработки информации)в секунду и соответственно производительность датчика лимитируется производительностью системы обработки. Также возможна ситуация, при которой теряются фокальные пятна ввиду больших искажений. Отсюда вытекают недостатки ДШГ: расчетная сложность и ограниченность измеряемой амплитуды искажений[2].

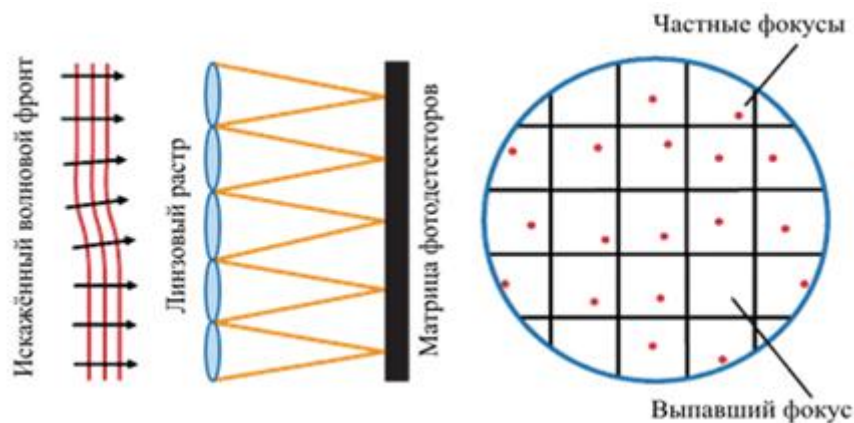


рис.5 Потеря фокального пятна в ДШГ

ДРУИЕ ВИДЫ ДВФ

Существуют различные виды ДВФ и модификации ДШГ, например, датчик кривизны волнового фронта.

В отличие от ДШГ датчик кривизны способен измерять как кривизну(сферичность) фронта целиком, так и его сегментированной части.

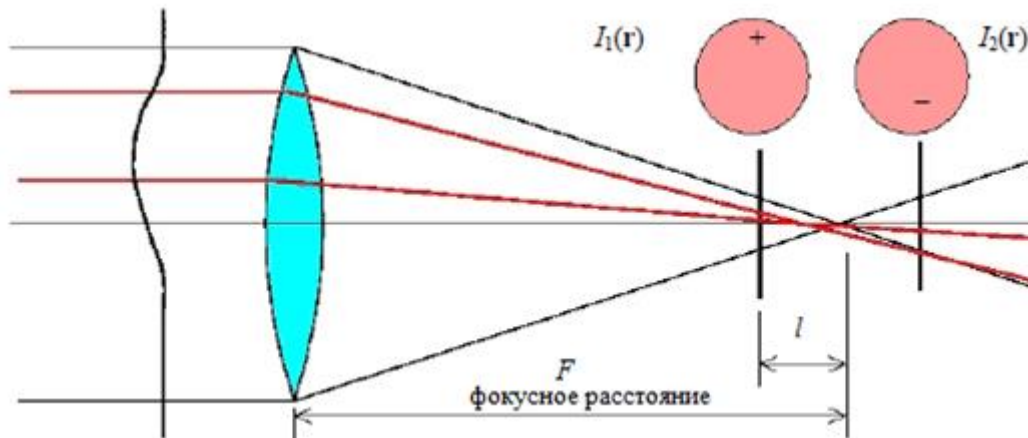


рис.6 Датчик кривизны волнового фронта

Если $I_1(r)$ – распределение интенсивности в предфокальном изображении звезды(в плоскости на расстояние l от фокальной), $I_2(r)$ – соответствующее распределение интенсивности в зафокальном изображении. Кривизна волнового фронта делает изображения различными по яркости и для разности их интенсивностей:

$$\frac{I_1(r) - I_2(r)}{I_1(r) + I_2(r)} = \frac{\lambda F(F-l)}{2\pi l} \left[\frac{\partial}{\partial n} \varphi \left(\frac{Fr}{l} \right) \delta_c - \nabla^2 \varphi \left(\frac{Fr}{l} \right) \right].$$

Первый член - градиент фазы на краю апертуры (δ_c – производная в направлении, перпендикулярном краю, умноженная на «функцию края»).

При помощи оператора Лапласа вычисляется кривизна фазового распределения $\varphi(r)$ [4].

Возвращаясь к интерферометрическим методам, рассмотрим схему интерферометра сдвига. Стоит заметить, что часть проблем связанных с их использованием можно решить, если боковой сдвиг ρ волновых фронтов (представляющих интерферирующие лучи) будет мал.

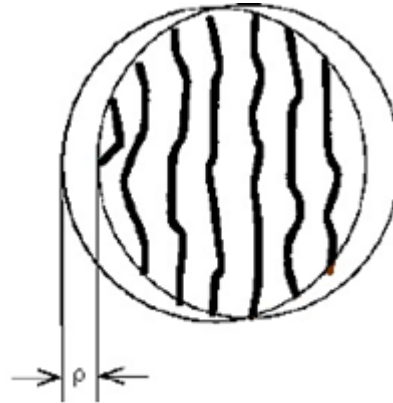


рис7.Интерферометр сдвига

При некоторых значениях сдвига разность фаз окажется меньше одной длины волны и можно избавиться от 2π -неопределенности. В интерферограмме выражение для интенсивности света принимает вид:

$$I(\mathbf{r}) = \left| e^{i\varphi(\mathbf{r})} + e^{i\varphi(\mathbf{r}+\boldsymbol{\rho})} \right|^2 = 2 + 2\cos[\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r}+\boldsymbol{\rho})] \approx 2 + 2\cos\left[\boldsymbol{\rho} \frac{\partial\varphi(\mathbf{r})}{\partial\boldsymbol{\rho}}\right].$$

Разность фаз при малых сдвигах будет пропорциональна первой производной(наклону), что делает данный интерферометр схожим с ДШГ. Интересно, что интерферометр сдвига был использован в одной из первых реализованных адаптивных оптических системах.

Для протяженных источников может быть использован пирамидальный ДВФ.



рис.8 Пирамидальный датчик

Прозрачная пирамидальная призма, расположенная в фокальной плоскости телескопа, разделяет звездное изображение на четыре части. На ПЗС-матрице возникает четыре изображения, фиксирующиеся ее четырьмя пикселями. Тогда наклон волнового фронта на одной из апертур изменит положение, что приведет к тому, что изображения на матрице окажутся различными. Вычисляя эти разности интенсивностей можно получить два сигнала, которые окажутся пропорциональными наклонам волнового фронта в двух направлениях. Выходной сигнал такого датчика схож с сигналом ДШГ[4].

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Чтобы обойти трудности, присущие всем рассмотренным ДВФ, в частности, чтобы миновать этап сложных расчетов, можно применить в ДВФ голографические методы.

Деформированный волновой фронт можно представить в виде разложения по некому базису. В качестве базиса можно взять систему полиномов Цернике, ортогональную на единичном круге.

$$\begin{aligned} \text{четные } Z_n^m(\rho, \varphi) &= R_n^m(\rho) \cos(m\varphi), \\ \text{нечетные } Z_n^{-m}(\rho, \varphi) &= R_n^m(\rho) \sin(m\varphi). \end{aligned}$$

полиномы

$R_n^m(\rho)$ – радиальные полиномы

$n \geq m$ – неотрицательные целые числа, $0 \leq \rho \leq 1$ – радиальная координата.
 φ – азимутальный угол

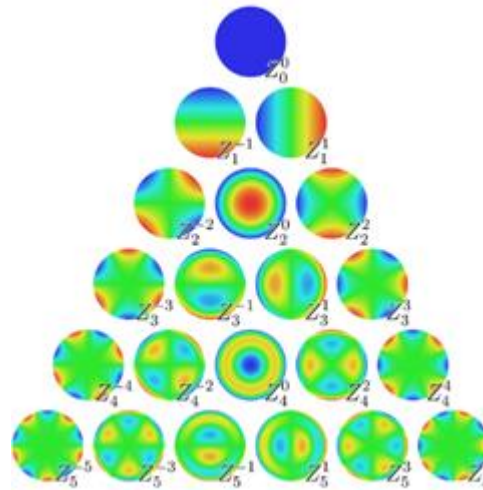


рис.9 Полиномы Цернике

Тогда деформированные поверхности можно представить суммой этих полиномов

$$G(\rho, \varphi) = \sum_{m,n} \left[a_{m,n} Z_n^m(\rho, \varphi) + b_{m,n} Z_n^{-m}(\rho, \varphi) \right].$$

Такое разложение задается однозначно.

**Полиномы Цернике (до 4-го порядка включительно)
и их соответствие зейделевским (первичным) aberrациям**

| j | n | l | $Z_n^m(\rho, \varphi)$ | Зейделевская aberrация |
|-----|-----|-----|--|--|
| 0 | 0 | 0 | 1 | Постоянный или поршневой сдвиг |
| 1 | 1 | -1 | $2\rho \sin \theta$ | Наклон вдоль оси y или дисторсия |
| 2 | 1 | 1 | $2\rho \cos \theta$ | Наклон вдоль оси x или дисторсия |
| 3 | 2 | -2 | $\sqrt{6} \rho^2 \sin 2\theta$ | Астигматизм с осями по азимутам $\pm 45^\circ$ |
| 4 | 2 | 0 | $\sqrt{3} (\rho^2 - 1)$ | Кривизна поля и дефокусировка |
| 5 | 2 | 2 | $\sqrt{6} \rho^2 \cos 2\theta$ | Астигматизм с осями по азимутам 0 и 90° |
| 6 | 3 | -3 | $\sqrt{8} \rho^3 \sin 3\theta$ | — |
| 7 | 3 | -1 | $\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$ | Кома вдоль оси y |
| 8 | 3 | 1 | $\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$ | Кома вдоль оси x |
| 9 | 3 | 3 | $\sqrt{8} \rho^3 \cos 3\theta$ | — |
| 10 | 4 | -4 | $\sqrt{10} \rho^4 \sin 4\theta$ | — |
| 11 | 4 | -2 | $\sqrt{10} (4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\theta$ | Вторичный астигматизм |
| 12 | 4 | 0 | $\sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$ | Сферическая aberrация и дефокусировка |
| 13 | 4 | 2 | $\sqrt{10} (4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\theta$ | Вторичный астигматизм |
| 14 | 4 | 4 | $\sqrt{10} \rho^4 \cos 4\theta$ | — |

Голографические методы позволяют ускорить время обработки, а также дают возможность прямого измерения коэффициентов Цернике.

Установлено, что можно ограничиться первыми 20-30 полиномами Цернике для описания искажений волнового фронта.

В голографическом подходе применяются голографические оптические элементы-голограммы, на которых предзаписываются волновые фронты необходимой формы.

Идея лежащая в основе этого метода: реконструкция голографически записанной волны и использование голографического мультиплексирования, то есть наложения нескольких голограмм, работающих как независимые элементы. Мультиплексированная голограмма записывается с набором aberrаций и представляет собой дифракционный оптический элемент.



рис.10 Запись голографического мультиплекса

Элементарный голографический мультиплекс, состоит из двух наложенных голограмм, каждая из которых записывается при помощи волны промодулированной одной из мод Цернике с амплитудой $+A$ и $-A$, и служит такая пара для кодирования одной моды Цернике. Сам мультиплекс состоит из набора таких элементарных мультиплексов голограмм, каждый из которых отвечает за свою моду Цернике.

Затем в процессе восстановления падающая волна дифрагирует на мультиплексе и делится на пучки, пропорциональные закодированным абберациям. Из сравнения пучков по интенсивности, измеряется амплитуда соответствующей моды Цернике[5].

Данный датчик имеет существенное преимущество перед ДШГ в скорости работы из-за отсутствия необходимости процедуры обработки.

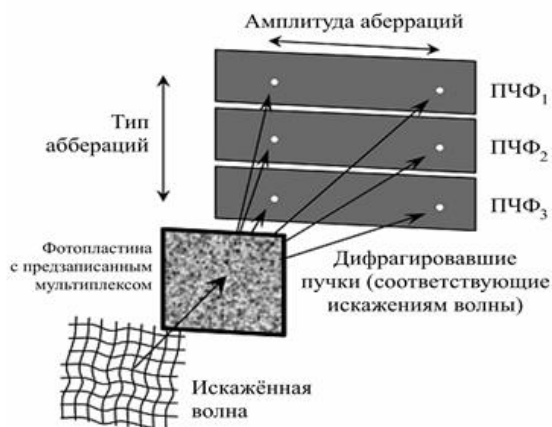


рис.12 Принцип работы ГДФ

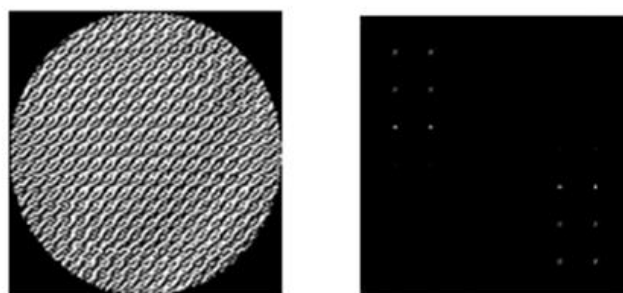


рис.13
Мультиплексированная голограмма для Z4, Z5, Z6 Восстановленное изображение

СХЕМА ЗАПИСИ МАТРИЦЫ ГОЛОГРАММ

При записи мультиплекса используется рассеиватель(диффузор) и линза, выполняющая Фурье-преобразование.

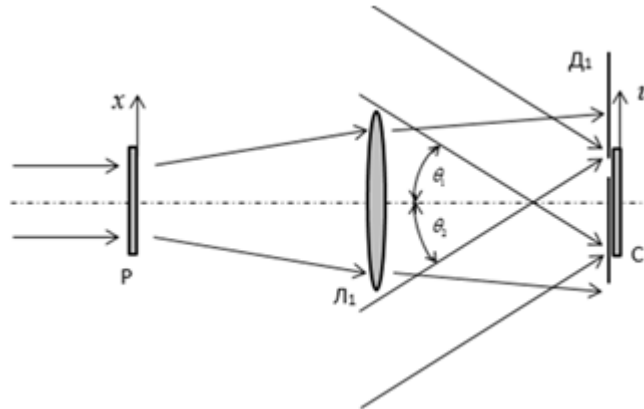


рис.13 схема записи матрицы голограмм: Р-рассеиватель, Л-линза, Д-диафрагма, С -регистрирующая среда.

Рассеиватель Р устанавливается в переднем фокусе линзы L_1 , а в задний фокус для записи голограмм регистрирующая среда С. Подвижная диафрагма D_1 устанавливается перед средой С и выделяет участок для записи одной голограммы.

Нормально рассеивателю падает волна модулированная модой Цернике. Опорной волной для записи голограммы служит диффузный пучок, получаемый на выходе из рассеивателя. Плоская волна, падающая под углом θ_1 к среде С служит объектной. Аналогично записывается вторая голограмма на том же участке среды, только с опорной волной промодулированной той же модой, но имеющая противоположную фазу. Под углом θ_2 к среде падает плоская объектная волна. Сдвигая диафрагму можно получить мультиплекс(матрицу голограмм).

Сам датчик содержит в том числе линзовые растры Т, расположенные соответственно объектным волнам голограмм. Растры разносят в пространстве сигналы, избавляя от шума перекрестных помех.

В их задних фокусах находятся диафрагмы D_2 , блокирующие шум, создаваемый рассеивателем. За ними находятся измеряющие интенсивность фотоприёмники Φ [6].

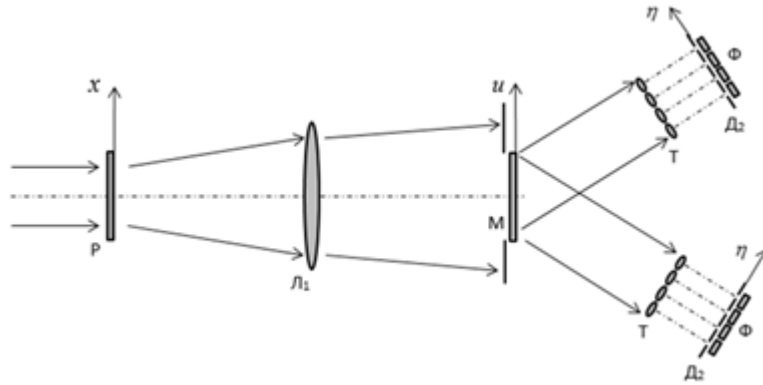


рис.14 Схема датчика волнового фронта: Р-рассеиватель, Л-линза, М-матрица голограмм, Т-линзовые растры, Д2-диафрагмы, Ф-фотоприемники

Пусть плоская волна амплитуды a , промодулированная полиномом Цернике $Z_l(x)$ амплитуды β падает нормально на рассеиватель(имеющий амплитудное пропускание $p(x)$). Тогда комплексная амплитуда волны после рассеивателя:

$$R_l(x) = ap(x)\exp[i2\pi\beta Z_l(x)]$$

А в области записи голограммы возникнет Фурье-образ этой волны $R_{lf}(x)$:

$$F_l[R_l(x)] = R_{lf}(u) = \int R_l(x) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda f_1} ux\right) dx,$$

λ длина волны излучения
 f_1 фокусное расстояние линзы L_1

Плоская объектная волна $\exp(ik_1u)$, падающая под углом θ_1 к регистрирующей среде интерферирует с опорной $R_{lf}(u)$ в плоскости записи голограммы.

Получим аналогично вторую голограмму на этом же участке среды при помощи плоской объектной волны $\exp(ik_2u)$, падающей под углом θ_2 к регистрирующей среде и опорной волны с противоположной фазой

$$R_{l2}(x) = ap(x)\exp[-i2\pi\beta Z_l(x)]$$

Пусть на датчик падает волна $\psi(x)$ с модой $Z_l(x)$ амплитуды α и набором мод Z_n с амплитудами γ_n :

$$\psi(x) \propto \exp\left[i2\pi\left(\alpha Z_l(x) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \gamma_n Z_n(x)\right)\right]$$

В заднем фокусе линзы Л после рассеивателя волна примет вид:

$$\psi_f(u) = F_1[p(x)\psi(x)]$$

Падая на матрицу голограмм происходит восстановление объектных волн; для первой из голограмм восстановленная волна:

$$O_{1f}(u) \propto \exp(ik_1 u) R_{1f}^*(u) \psi_f(u) \text{rect}\left(\frac{u-u_0}{d}\right)$$

,где u_0 - координата центра голограммы, d - ширина голограммы

Затем эта волна падает на соответствующую линзу раstra Т, в фокусе которой возникнет ее Фурье-образ:

$$O_{1T}(\eta) \propto F_2\left[R_{1f}^*(u) \psi_f(u) \text{rect}\left(\frac{u-u_0}{d}\right)\right]$$

Пусть q -отношение фокусного расстояния линзы Л₁ к фокусному расстоянию линз раstra, тогда имеем:

$$O_{1T}(\eta) \propto F\left[R_{1f}^*(u) \psi_f(u)\right] = \int p^*(q\xi) \exp[-i2\pi\beta Z_l(q\xi)] p[q(\xi-\eta)] \exp\left[i2\pi\left[\alpha_l Z_l[q(\xi-\eta)] + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \gamma_n Z_n[q(\xi-\eta)]\right]\right] d\xi$$

На оптической оси при $\eta = 0$

$$O_{1T}(0) \propto \int |p(q\xi)|^2 \exp\left[i2\pi\left[(\alpha - \beta)Z_l(q\xi) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \gamma_n Z_n(q\xi)\right]\right] d\xi$$

и аналогично для второй голограммы:

$$O_{2T}(0) \propto \int |p(q\xi)|^2 \exp\left[i2\pi\left[(\alpha + \beta)Z_l(q\xi) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \gamma_n Z_n(q\xi)\right]\right] d\xi$$

Полученные выражения для голографического датчика схожи с зависимостями для других модовых датчиков[6].

Диффузер позволяет получить лучшее соотношение сигнал/шум, но в то же время он создает дополнительный шум, характерный для голограмм с протяженным источником. Однако этот шум блокируется диафрагмами в заднем фокусе линзовых растров.

Количество голограмм, содержащихся в мультиплексе зависит от площади диффузного пучка, содержащего все пространственные частоты мод. Мультиплекс может содержать 64 голограммы, что соответствует 32 полиномам, с возможностью быстрого обсчета без сложной процедуры обработки.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Схема для записи мультиплекса:

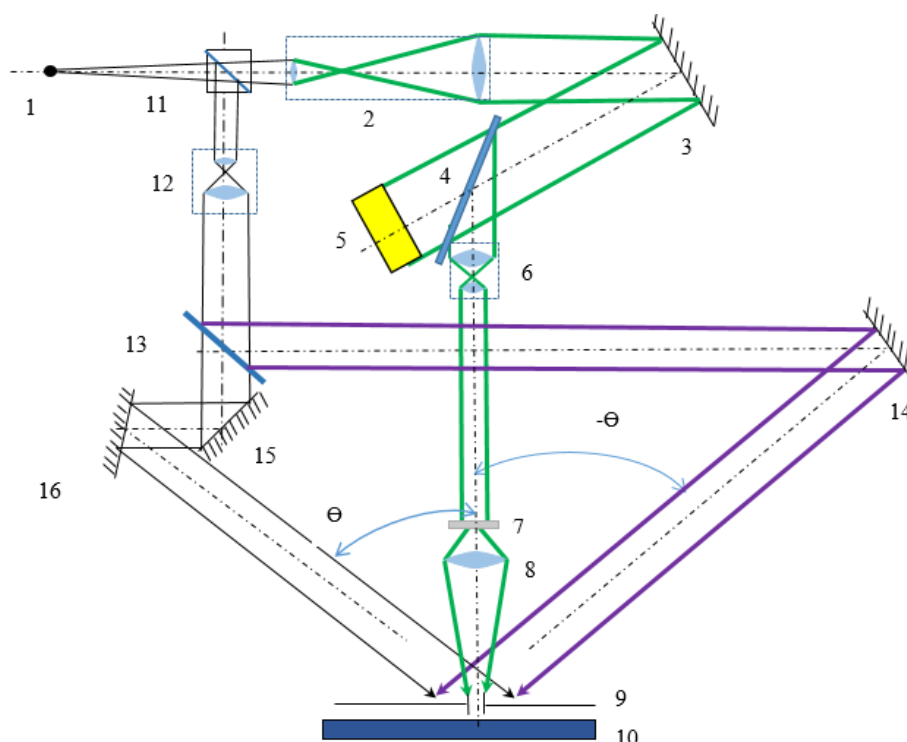


рис.15 Принципиальная схема записи:

1 – источник излучения, He-Ne, 15мВт; 2, 6, 12 – коллиматор; 3 – биморфное зеркало; 4, 13 – полупрозрачное зеркало; 5 – датчик ШГ; 7 – диффузер; 8 – объектив 100-120мм; 9 – диафрагма; 10 – фотопластинка; 11 – светоделительный кубик; 14, 15, 16 – глухие зеркала.

Излучение He-Ne лазера ($\lambda = 632 \text{ нм}$, 15 мВт) (1) делится кубиком (11) на два луча:

опорный (зеленый 1-11-2-3-6-7-8-9-10) и объектный (черный 1-11-12-13-15-16-9-10) .

Опорная волна:

Излучение (1), пройдя светоделительный кубик (11), расширяясь коллиматором (2) до апертуры $d=50 \text{ мм}$, попадает на биморфное зеркало (3) $d=50 \text{ мм}$. Биморфное зеркало (3), меняя свою форму, модулирует фазу изначально плоской волны одним из полиномов Цернике.

Затем эта промодулированная волна, попадает на полупрозрачное зеркало (4) – форма волнового фронта одной части излучения анализируется датчиком Шака-Гартмана (5), другая часть сжимается коллиматором (6) до входной апертуры диффузера (7), $d=10-15 \text{ мм}$., находящегося в переднем фокусе объектива (8) (100-120 мм), фотопластинка (10) размещается в заднем фокусе объектива.

Перед ней устанавливается подвижная диафрагма (9) размера, соответствующего диаметру записываемой голограммы (это позволяет отсечь шум и предотвратить засветку остальной области).

Предметная волна:

Излучение (1) после светоделительного кубика (11) расширяется коллиматором (12) до апертуры $d=60$ мм, соответствующей диаметру рассеянного от диффузера (7) излучения в плоскости фотопластинки (10). Затем плоский волновой фронт попадает на полупрозрачное зеркало (13), отражается от глухого зеркала 15 (путь между зеркалами 13-15-16 служит для регулировки разности хода опорного и объектного пучков), при помощи зеркала (16) плоский волновой фронт направляется на фотопластинку под углом $+\Theta$ к нормально падающему опорному лучу.

Опорная волна (зеленая), с закодированной в ней информацией о полиноме $+A$, падая нормально на фотопластинку (10), интерферирует в плоскости фотопластинки (10) с плоской предметной (черной) волной, падающей на фотопластинку под углом $+\Theta$.

При помощи биморфного зеркала (3) задается искажение волнового фронта для записи второго полинома амплитуды $-A$ и полученный опорный пучок интерферирует с предметным пучком (фиолетовый), проходящим путь от лазера (1) через светоделительный кубик (11), коллиматор (12), полупрозрачное зеркало (13) и глухое зеркало (14), которое направляет его под углом $-\Theta$ на плоскость фотопластинки (10). Голограммы с полиномами $\pm A$ записываются одна на другую без передвижения диафрагмы.

Для записи голограмм, соответствующих другим полиномам, диафрагму (9) передвигают и уже на новом участке фотопластинки 10 записывают интерференцию объектной плоской волны (падающей под теми же углами $+\Theta$ и $-\Theta$) и опорной, с закодированной в ней информацией о новом полиноме Цернике (задаваемой деформацией биморфного зеркала). Количество голограмм в мультиплексе также определяется диаметром рассеянного диффузером (7) пучка в плоскости фотопластины (10).

Восстановление:

Восстановление происходит при помощи голографического датчика, принципиальная схема которого приведена на рис.16. На диффузер, расположенный в заднем фокусе объектива (100-120 мм), падает искаженная волна, затем рассеянный свет, проходя через диафрагму, падает на голографический мультиплекс, в переднем фокусе объектива. За мультиплексом находятся два приемных канала под углом $-\Theta$ и $+\Theta$ (относительно оси падающего луча). Каналы состоят из линзового раstra (линзлета), диафрагмы и фотоприемника в фокусе линзлета.

Если в искаженной падающей волне присутствуют искажения соответствующие предзаписанным полиномам в мультиплексе, то восстанавливается объектная волна, проходящая через линзовый растр и диафрагмы и регистрируется фотоприемником. О наличии и амплитуде определенных полиномов можно судить по положению и интенсивности восстановленной волны. В случае, если амплитуда полинома Цернике попадает в интервал $(-A, +A)$, то волна восстанавливается на обоих каналах и исходя из отношения интенсивностей можно сделать вывод о интенсивности искомой волны.

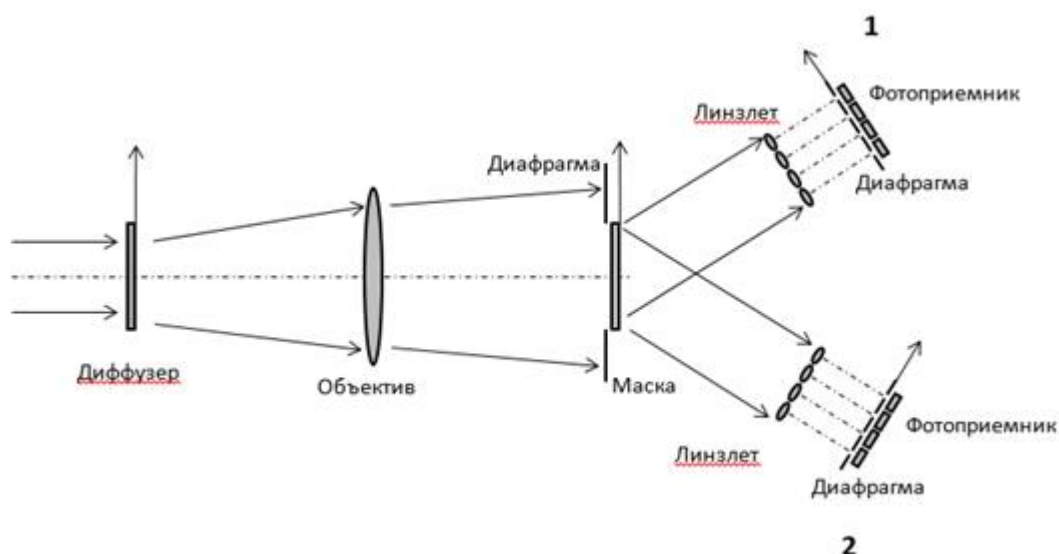


рис.16 Принципиальная схема ГДФ

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАТЬ

1. Проверка поляризации.

При помощи пленочного поляризатора и анализатора была произведена проверка поляризации излучения. Поляризация оказалась линейной вертикально направленной. Затем при помощи схемы (рис.17) определено влияние диффузора на поляризацию. Свет после поляризатора(1), проходя рассеиватель (2), попадает на поляризатор(3).

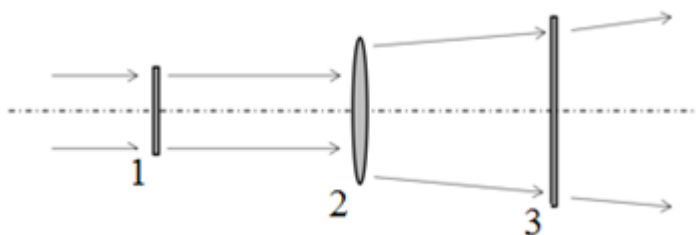


рис.17 Схема для определения типа поляризации источника
1-поляризатор, 2-рассеиватель, 3-поляризатор

Максимальная интенсивность излучения наблюдалась при угле 0° поляризатора.

Излучение не проходило через поляризатор при угле $\pm 90^\circ$. Поляризация света источника не изменилась. При вращении диффузера интенсивность не менялась откуда можно сделать вывод, что диффузер не влияет на характер поляризации.

2. Расчет угла расходимости после диффузера.

На диффузер падает пучок диаметром $d = 1,5$ см (апертура ограничена диафрагмой). На расстоянии $L = 10$ см от диффузера измеряется диаметр рассеянного пучка d_1 , оказавшийся равным 5,8 см. (рис. 18).

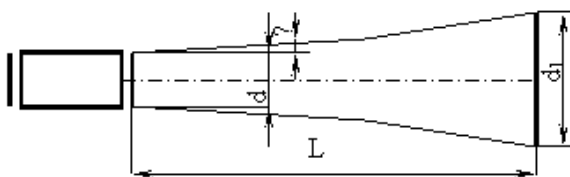


Рис. 18. – Расходимость пучка
 $d = 0,015$ (м); $d_1 = 0,058$ (м); $L = 0,1$ (м).

Тангенс угла расходимости пучка θ рассчитан по формуле (1):

$$\operatorname{tg} \theta = (d_1 - d) / 2L \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \theta = (0,058 - 0,015) / 2 * 0,1 = 0,215; \theta = \arctg(0.215) = 12,134^\circ,$$

$$\theta_{\text{полный}} = 24,26^\circ$$

Для данной модели диффузера ED1-C20-MD (из паспортных данных) имеем круглое распределение рассеянного излучения. В пределах угла рассеяния 20° интенсивность равномерно распределена и составляет примерно 80-85% от интенсивности падающего излучения. Однако может наблюдаться скачок интенсивности (638 нм), но его интенсивность составляет менее 8% от интенсивности падающего.

По паспортным данным, предельный угол составляет 27° и измеряется на половине 50% интенсивности падающего излучения (обведено красным).

| Specifications | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Material | Injection Molded ZEONOR ^a |
| Index of Refraction | 1.53 |
| Design Wavelength | 400 - 700 nm (Achromatic) |
| Transmission Spectrum | 380 - 1100 nm |
| Size | Ø1" (Ø25.4 mm) |
| Optic Thickness | 1.5 mm |
| Mount Thickness | 12.7 mm |
| Incident Beam Size | ≥0.5 mm |
| Clear Aperture | 95% of Ø1" |

a. Other materials such as fused silica and silicon are available upon request. Please [e-mail](#) our Technical Support department for a quote.

| Item # | Pattern | Divergence ^a | | | Transmission Efficiency |
|----------------|---------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | | Flat Intensity Region ^b | 50% of Max Intensity ^c | 10% of Max Intensity ^d | |
| ED1-S20(-MD) | Square | 20° | 27° | 36° | 90% |
| ED1-S50(-MD) | Square | 50° | 60° | 70° | 90% |
| ED1-C20(-MD) | Circle | 20° | 27° | 36° | 90% |
| ED1-C50(-MD) | Circle | 50° | 60° | 70° | 90% |
| ED1-L4100(-MD) | Line | 100° | 105° | 115° | 90% |

a. Angles are defined for collimated 633 nm incident light. Other wavelengths or degrees of collimation may cause nominal variance, see *Graphs* tab.

b. Angle by which relative intensity has dropped to 50%

c. Angle by which relative intensity has dropped to 10%

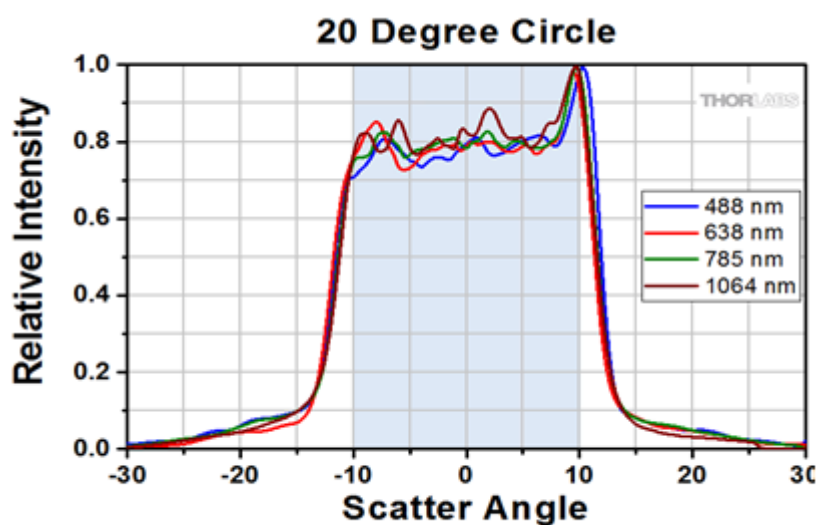


рис.19 Угловое распределение интенсивности

3. Определение резкости изображения и мощности рассеянного света.

Излучение от источника света, проходя коллиматор (2) падает на миру (3), вплотную с которой расположен диффузер (4) диффузной стороной. Микроскоп фокусируется на заднюю поверхность диффузера и получается изображение миры с пространственной частотой 3,2 л/мм.

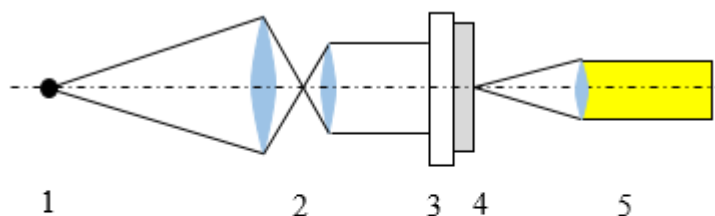


рис.20 Проверка пригодности рассеивателя по толщине:

1 – источник излучения; 2 – коллиматор (расширяющий);
3 – мира; 4 – диффузер; 5 – микроскоп

При помощи микроскопа можно получить четко сфокусированное изображение миры из этого можно сделать вывод, что толщина диффузора(4) не будет оказывать влияния в дальнейшем.

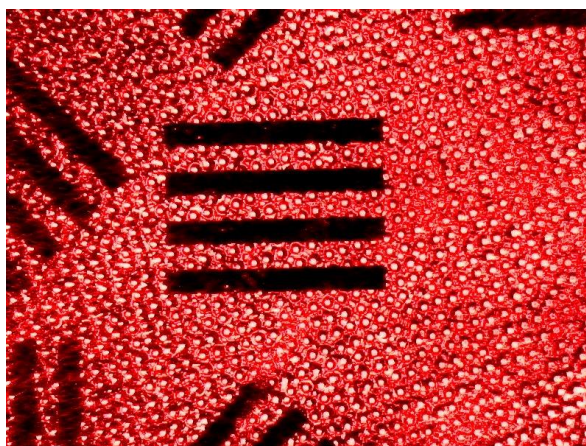


рис21. Изображение миры с микроскопа.

Для определения контрастности изображения: вместо микроскопа был установлен мультиметр с фотодиодом для измерения напряжения, пропорционального интенсивности света. Для фокусировки микроскопа на одной полосе миры поменяли ее местами с диффузором.

Контрастность изображения рассчитана исходя из максимальной и минимальной интенсивности излучения показаний мультиметра

$$U_{max} = 6,6 \text{ мВ}, U_{min} = 0,09 \text{ мВ}.$$

$$V = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} \quad (2)$$

$$V = (6,6 - 0,09) / (6,6 + 0,09) = 0,97 \text{ мВ}, \text{ что близко к единице.}$$

4. Определение интенсивности излучения после диффузора

Излучение источника проходит через коллиматор (2) и диффузор (3). С помощью фотодиода и мультиметра измеряется значение напряжения, пропорциональное интенсивности света.

Интенсивность света после диффузора и интенсивность лазерного излучения без диффузора оказались практически равны и составили 280 мВт/м^2 . Что означает, что толщина диффузора не влияет на характеристики излучения.

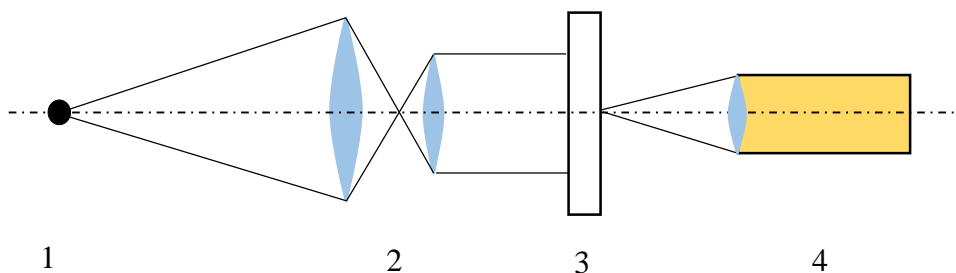


рис22. Определение интенсивности излучения после рассеивателя

1 – источник излучения; 2 – коллиматор (расширяющий); 3 – диффузор;
4 – фотодиод

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены различные виды датчиков волнового фронта, принципы их действия. Исследования в области голографического вида датчика волнового фронта являются перспективными– он имеет существенное преимущество в скорости работы, так как не требует сложной процедуры обработки (позволяет напрямую измерять коэффициенты Цернике), что делает его пригодным для использования в системах реального времени.

Рассмотрена принципиальная схема датчика; проведены подготовительные работы, необходимые для дальнейших этапов по созданию голографического датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. – 336 с.
2. Венедиктов В. Ю. Основы адаптивной оптики: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014 – 48 с.
3. Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
4. А. Токовинин. Лекции по адаптивной оптике. <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/> 2005
5. В.Ю.Венедиктов СПбГЭТУ «ЛЭТИ», М.А.Соловьев ГОИ им. С.И.Вавилова Голографические датчики волнового фронта.
6. В. В. Орлов. Голографический модовый датчик с увеличенным числом измеряемых мод. Университет ИТМО, 2017–9с.